

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ О.М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ТА ЗАВДАННЯ**  
для практичних занять, самостійної роботи та РГР  
із навчальної дисципліни

***«РОЗРАХУНОК І КОНСТРУЮВАННЯ ОПТИКО-  
ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ»***

*(для студентів денної і заочної форм навчання  
спеціальності 141– Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка,  
спеціалізація «Світлотехніка і джерела світла»)*

**Харків – ХНУМГ ім. О. М. Бекетова – 2017**

Методичні вказівки та завдання для практичних занять, самостійної роботи та РГР із дисципліни «Розрахунок і конструювання оптико-електронних приладів» (для студентів денної і заочної форм навчання спеціальності 141–Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, спеціалізація «Світлотехніка і джерела світла») / Харків нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад.: А. С. Литвиненко – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 32 с.

Укладач канд. техн. наук, доц. А. С. Литвиненко

Рецензент канд. фіз-мат. наук, доцент Г. О. Петченко

*Рекомендовано кафедрою Світлотехніка і джерела світла,  
протокол № 7 від 23. 03. 2017 р.*

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
1 ТЕЛЕСКОПІЧНІ СИСТЕМИ.....	5
1.1 ПРИНЦИПОВА СХЕМА ТЕЛЕСКОПІЧНОЇ СИСТЕМИ. ОСНОВНІ ОПТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ .....	5
1.2 ОБ'ЄКТИВИ ТЕЛЕСКОПІЧНИХ СИСТЕМ.....	8
1.3 ОКУЛЯРИ ТЕЛЕСКОПІЧНИХ СИСТЕМ.....	9
1.4 ПРОСТІ ТЕЛЕСКОПІЧНІ СИСТЕМИ. ЗОРОВІ ТРУБИ КЕПЛЕРА І ГАЛІЛЕЯ.....	11
1. 5 ОБЕРТАЮЧІ СИСТЕМИ – ЛІНЗОВІ І ПРИЗМАТИЧНІ.....	14
1.6 ПРИЗНАЧЕННЯ КОЛЕКТИВА В ТЕЛЕСКОПІЧНІЙ СИСТЕМІ.....	19
2 ГАБАРИТНІ РОЗРАХУНКИ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ .....	19
2. 1 ЗАДАЧІ ГАБАРИТНОГО РОЗРАХУНКУ .....	19
2. 2 ГАБАРИТНІ РОЗРАХУНКИ ОПТИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ.....	20
2. 3 ГАБАРИТНІ РОЗРАХУНКИ ТЕЛЕСКОПІЧНИХ СИСТЕМ .....	25
2.4 ГАБАРИТНИЙ РОЗРАХУНОК ЗОРОВОЇ ТРУБИ КЕПЛЕРА. ....	28
3 ВАРІАНТИ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ.....	30
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	31

## ВСТУП

Методичні вказівки та завдання для практичних занять та самостійної роботи з дисципліни «Розрахунок і конструювання оптико-електронних приладів» (далі – РКОЕП) спрямовані на набуття студентам знань, умінь та навичок з питань проектування оптичних приладів, що розроблюються на базі одної з основних оптичних систем – телескопічної системи. Цей проект виконується студентами в другому семестрі на п'ятому курсі. При виконанні проекту студенти застосовують знання з загальних питань проектування приладів, які вони отримали раніше при вивченні таких дисциплін, як «Світлові прилади», «Розрахунок і конструювання світлових приладів», «Комп'ютерні інформаційні технології в світлотехніці» та інших. Дисципліна «Розрахунок і конструювання оптико – електронних приладів» має на меті надати студентам теоретичні і практичні знання пов'язані із специфікою проектування точних оптичних приладів. Процес проектування, як відомо, містить дві основні складові: розрахункова частина і безпосереднє виконання креслень приладу, що проектується. Основний акцент у вказівках поставлений на допомозі студентам у вирішенні першої складової процесу проектування. При цьому мається на увазі, що друга частина більш ефективно може бути вирішена під час практичних занять та індивідуальних консультацій студентів викладачем.

Дані методичні вказівки складені згідно діючої програми відповідної дисципліни. Програмою передбачено зокрема самостійна робота студентів по поглибленню знань певних розділів дисципліни РКОЕП, працюючи самостійно з науково-технічною літературою. Посилання на літературні джерела у вказівках допоможуть студентам підібрати необхідну літературу для самостійного вивчення.

Методичні вказівки будуть корисними для практичних занять, самостійної роботи та виконання студентами курсової роботи, а також при вивченні інших навчальних дисциплін, які викладаються на кафедрі «Світлотехніка та джерела світла» та споріднених кафедрах.

# 1 ТЕЛЕСКОПІЧНІ СИСТЕМИ

## 1.1 Принципова схема телескопічної системи. Основні оптичні характеристики

Оптичні системи, призначені для спостереження далеких предметів, називаються *телескопічними системами*, або *зоровими трубами*.

До телескопічних систем відносяться системи геодезичних приладів (теодоліт, нівелір та ін.), астрономічних труб, спостережних приладів (біноклі, перископи, далекоміри і таке інше). Телескопічні системи працюють спільно з оком спостерігача, тому їх ще називають зоровими трубами.

Так як предмет, що спостерігають, вельми віддалений, то можна вважати, що промені, що виходять з будь-якої точки предмета, входять в телескопічну систему паралельними пучками. Для того щоб око спостерігача без акомодаци бачило чітко зображення предмета, необхідно, щоб з телескопічною системою виходили також паралельні пучки променів.

Отже, принцип дії телескопічної системи полягає в тому, що, якщо від двох точок віддаленого предмета в неї надходять два пучка паралельних променів і кут між пучками дорівнює  $\omega$ , то на виході телескопічної системи промені залишаються паралельними, але кут між пучками зміниться і дорівнюватиме  $\omega'$  (рис. 1.1). Якщо  $\omega' > \omega$ , то око спостерігача побачить зображення предмета під більшим кутом зору, тобто предмет буде здаватися наближеним до спостерігача.

Телескопічна система, як мінімум, повинна складатися з двох компонентів – об'єктива і окуляра. Щоб паралельні промені пучків в просторі предметів були паралельними і в просторі зображень, необхідно поєднати задній фокус об'єктива з переднім фокусом окуляра, при цьому оптичний інтервал  $\Delta$  дорівнюватиме нулю. На рисунку 1.2 умовно представлена схема простої телескопічної системи. Позначимо оптичну силу об'єктива 1, що знаходиться в повітрі, через  $\Phi_{об} = 1/f'_{об}$ , а окуляра 2 – через  $\Phi_{ок} = 1/f'_{ок}$ , відстань між головними площинами  $H'_{об}$  і  $H_{ок}$ , зверненими одна до іншої,  $d = f'_{об} - f'_{ок}$ , і якщо  $-f_{ок} = f'_{ок}$ , то  $d = f'_{об} + f'_{ок}$ . Оптична сила телескопічної системи, обчислена за формулою  $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - d\Phi_1\Phi_2$ , при  $d = 1/\Phi_{об} + 1/\Phi_{ок}$ , дорівнює 0, а фокусна відстань дорівнює нескінченності. Тому телескопічну систему називають *афокальною*.

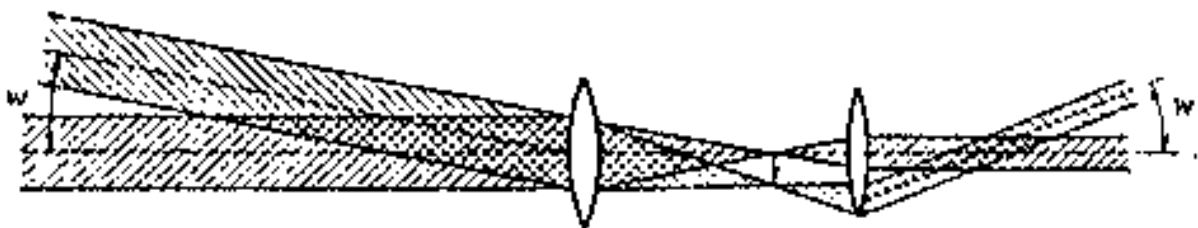


Рисунок 1.1 – Принцип дії телескопічної системи

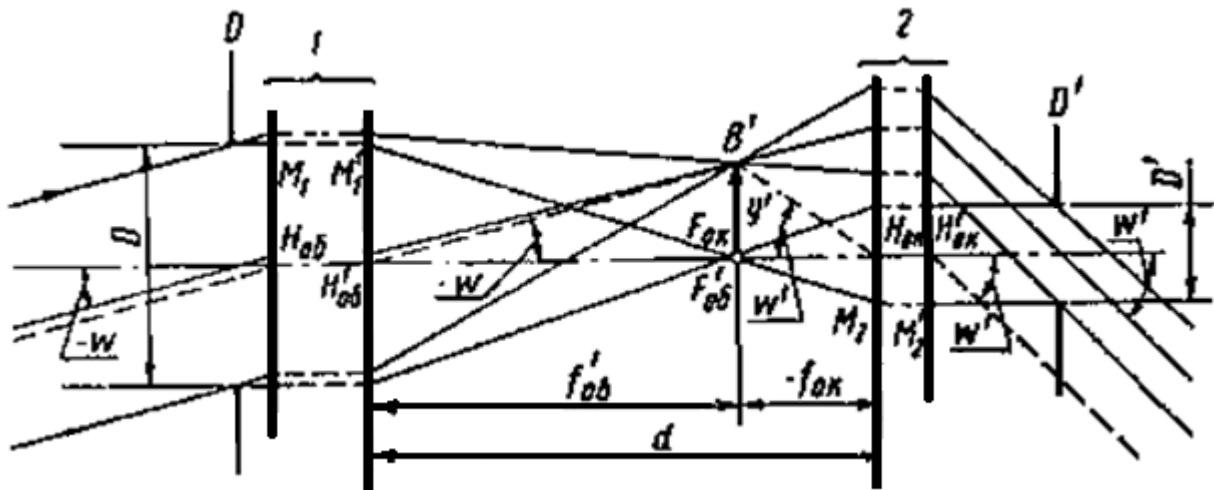


Рисунок 1.2 – Схема ходу променів в простій телескопічній системі

Основними оптичними характеристиками оптичної системи є збільшення  $\Gamma_T$ , кутове поле  $2\omega$ , діаметр вихідної зіниці  $D'$ , віддалення вихідної зіниці від останньої поверхні окуляра  $S'p'$  і роздільна здатність  $\psi$ .

На рисунку 1.2 зображений пучок паралельних променів, що йдуть з нескінченно віддаленої точки предмета під кутом  $\omega$  до оптичної осі. Головний промінь цього пучка проходить через центр вхідної зіниці. Очевидно, що око без телескопічної системи побачило би цю нескінченно віддалену точку під тим же кутом  $\omega$ . З окуляра системи вийде також пучок паралельних променів, але вже під іншим кутом  $\omega'$  до оптичної осі, тобто, око бачить зображення предмета через систему під кутом  $\omega'$ .

У загальній фокальній площині об'єктива і окуляра утворюється проміжне зображення предмета  $y'$ . Проведемо допоміжні промені (на малюнку вони показані штриховими лініями), один з яких проходить через передню головну точку об'єктива і паралельний вхідному пучку, а другий - через передню головну точку окуляра паралельно вихідному пучку. З трикутників  $H'_{об}B'F'_{об}$  і  $F_{ок}B'H'_{ок}$  визначимо величину  $y'$ :

$$y' = -f'_{об} \operatorname{tg} \omega;$$

$$y' = -f_{ок} \operatorname{tg} \omega' = f'_{ок} \operatorname{tg} \omega'.$$

Прирівнюємо праві частини цих виразів:  $-f'_{об} \operatorname{tg} \omega = f'_{ок} \operatorname{tg} \omega'$ , звідки

$$\frac{\operatorname{tg} \omega'}{\operatorname{tg} \omega} = -\frac{f'_{об}}{f_{ок}}.$$

Відношення тангенсів кутів  $\omega'$  і  $\omega$  називають кутовим збільшенням  $\gamma$  телескопічної системи, а так як кут  $\omega'$  визначає видиму величину зображення, то кутове збільшення телескопічної системи називають видимим збільшенням, або просто збільшенням телескопічної системи  $\Gamma_T$ .

Отже, збільшенням телескопічної системи називається відношення тангенса кута, під яким око спостерігача бачить зображення, утворене оптичною системою, до тангенсу кута, під яким предмет видно неозброєним оком. Якщо це відношення позитивне, то оптична система утворює пряме

зображення, якщо ж воно негативне, то зображення буде перевернутим (зворотним). Для телескопічної системи збільшення може бути виражено відношенням діаметрів вхідної  $D$  і вихідної  $D'$  зіниць. У простій телескопічній системі апертурною діафрагмою, як правило, є оправа об'єктива, отже, вхідна зіниця збігається з самою апертурною діафрагмою. Вихідною зіницею буде зображення, апертурної діафрагми, що дається окуляром.

На рисунку 1.2 промінь, що проходить через край вхідної зіниці паралельно оптичній осі, перетинає головні площини об'єктива в точках  $M_1$  і  $M'_1$ , а головні площини окуляра - в точках  $M_2$  і  $M'_2$ . З подібності трикутників  $M'_1F'_{об}H'_{об}$  і  $M_2F_{ок}H_{ок}$  маємо:

$$\frac{D}{D'} = \frac{f'_{об}}{f_{ок}} = -\frac{f'_{об}}{f'_{ок}}.$$

Остаточне збільшення може бути виражено формулою:

$$\Gamma_T = \frac{\operatorname{tg} \omega'}{\operatorname{tg} \omega} = \frac{D}{D'} = -\frac{f'_{об}}{f'_{ок}}. \quad (1.1)$$

Кутове поле телескопічної системи характеризує умовну величину різкості предметів. В системі з позитивним окуляром воно обмежене діафрагмою, встановленої в передній фокальній площині окуляра, де виходить проміжне зображення, що дається об'єктивом. Кутове поле  $2\omega$  телескопічної системи визначається можливим кутовим полем  $2\omega'$  окуляра обраного типу, що є більш складним елементом оптичної системи. Кутове поле обчислюють за формулою:

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{\operatorname{tg} \omega'}{\Gamma_T} \quad (1.2)$$

Діаметр вихідної зіниці зазвичай задається рівним діаметру зіниці ока або трохи більшим. У тих випадках, коли потрібне велике збільшення, наприклад, в геодезичних трубах, діаметр вихідної зіниці беруть менше діаметра зіниці ока (2-3 мм). Знаючи діаметр вихідної зіниці, за формулою (1) визначають діаметр вхідної зіниці:  $D = D'\Gamma_T$ .

Віддалення, або винесення, вихідної зіниці не повинно бути менше 10–12 мм, інакше важко буде поєднати з ним зіницю ока. У деяких випадках, наприклад, при роботі в протигазі, віддалення вихідної зіниці необхідно не менше 20–25 мм. Є цілий ряд телескопічних систем, де віддалення вихідної зіниці потрібно не менше 50 мм.

Роздільну здатність телескопічних систем оцінюють в кутовій мірі. Її величина повинна знаходитися у відповідності з роздільною здатністю ока (60"). Отже, роздільна здатність в просторі предметів  $\psi_T = 60''/\Gamma_T$ .

Роздільної здатності телескопічної системи повинна відповідати і роздільна здатність об'єктива, яка визначається за формулою  $\psi_{об} = 140''/D$ .

Прирівнюючи ці роздільні здатності отримаємо

$$\frac{60}{\Gamma_T} = \frac{140}{D},$$

звідки  $\Gamma_T = \Gamma_{\Pi} = \frac{D \cdot 60}{140} = 0.43D. \quad (1.3)$

Збільшення  $\Gamma_n$  визначене формулою (3), називається корисним збільшенням телескопічної системи.

## 1.2 Об'єктиви телескопічних систем

Об'єктив телескопічної системи служить для отримання дійсного проміжного зображення. Основні характеристики об'єктива: фокусна відстань  $f'_{об}$ , відносний отвір  $D/f'_{об}$ , кутове поле  $2\omega$ , роздільна здатність  $\psi$  і якість зображення (стан корекції).

У більшості випадків об'єктиви телескопічних систем мають порівняно великі фокусні відстані. Чим більше фокусна відстань об'єктива, а отже, і збільшення телескопічної системи, де встановлено такий об'єктив, тим менше його кутове поле.

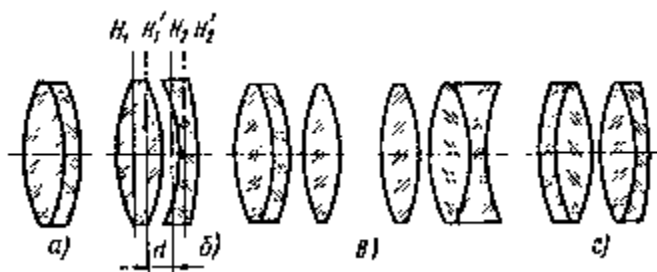


Рисунок 1.3 – Об'єктиви телескопічних систем:

а – дволінзовий; б – з двох несклеєних лінз; в – трьохлінзовий;  
г – чотирьохлінзовий

Найбільш поширеним є двохлінзовий склеєний об'єктив (рис. 1.3, а) одна з лінз якого позитивна (з крона), друга негативна (з флінта). Комбінуючи скла різних марок, вдається отримати об'єктив з гарним виправленням аберації в центрі поля при відносному отворі 1:5. Кутове поле двохлінзового об'єктива не перевищує  $8 - 10^\circ$ . Чим вище вимоги до якості зображення, тим менші відносний отвір і кутове поле об'єктива. Наприклад, в астрономічних трубах і коліматорах, де потрібна особливо гарна якість зображення, застосовують двохлінзові об'єктиви з відносним отвором від 1:10 до 1:12 з кутовим полем  $1 - 2^\circ$ .

В об'єктиві з двох не склеєних лінз (рис. 1.3, б) відносний отвір може бути підвищено до 1:3.

Крім того, за рахунок зміни зазору між лінзами можна в невеликих межах змінювати фокусну відстань і таким чином отримувати точну задану фокусну відстань об'єктива, не витримуючи жорстких допусків на виготовлення лінз.

При великому відносному отворі від 1:1,5 до 1:2 застосовують трьохлінзові об'єктиви (рис. 1.3, в), кутове поле яких також не велике і складає  $10 - 12^\circ$ . Якщо об'єктив повинен мати велике поле, то використовують більш складні конструкції, наприклад, чотирьохлінзові. Іноді в якості чотирьохлінзового ширококутного об'єктива застосовують конструкцію типу



окуляра, що складається з двох однакових склеєних компонентів (рис. 1.3, г). Вхідна зіниця у такого об'єктива завжди винесена вперед. Відносний отвір його 1:4, кутове поле до  $40^\circ$ .

### 1.3 Окуляри телескопічних систем

Основні характеристики окулярів: фокусна відстань  $f'_{\text{ок}}$ , видиме збільшення  $\Gamma$ , відносний отвір або діаметр вихідної зіниці  $D'$ , кутове поле  $2\omega'$ , віддалення вихідної зіниці від останньої поверхні  $S'_p$ , передній фокальний відрізок  $S_F$ .

Окуляри зазвичай мають позитивну задню фокусну відстань, за винятком окуляра труби Галілея. Для фокусних відстаней окулярів встановлено нормальний ряд значень: 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50 мм. Найбільшого поширення мають окуляри з фокусною відстанню від 20 до 30 мм.

Видиме збільшення окуляра визначається за формулою

$$\Gamma = \frac{250}{f'_{\text{ок}}}.$$

Відносний отвір окуляра телескопічної системи має дорівнювати відносному отвору об'єктива; дійсно, з (1.1) маємо:

$$\frac{D}{f'_{\text{об}}} = \frac{D'}{f'_{\text{ок}}}.$$

Кутове поле окуляра пов'язано з кутовим полем телескопічної системи формулою

$$\text{tg } \omega' = \Gamma_{\text{т}} \text{tg } \omega. \quad (1.4)$$

У телескопічних системах вихідна зіниця, що є зображенням вхідної зіниці через окуляр, як правило, знаходиться поблизу заднього фокусу окуляра. Тому про віддалення вихідної зіниці  $S'_p$  можна судити за величиною заднього фокального відрізка  $S'_F$  окуляра. Чим більше збільшення телескопічної системи, а отже, і фокусна відстань об'єктива, тим менше відстань  $S'_p$  відрізняється від  $S'_F$ .

Окуляри розраховують для нормального (еметропічного) ока; в цьому випадку зображення, отримане об'єктивом, знаходиться в передній фокальній площині окуляра. Такий стан окуляра будемо називати нульовим. Для еметропічного ока окуляр переміщують від нульового положення: в сторону до об'єктива (всувають) для короткозорого ока і від об'єктива (висувають) - для далекозорого. Величина  $z$  зміщення окуляра на одну діоптрію визначається формулою

$$z = \frac{f'^2_{\text{ок}}}{1000}.$$

Зазвичай механізм діоптрійного переміщення окуляра розраховують на діапазон 10 дптр: від  $-5$  до  $+5$  дптр.

Розглянемо основні типи окулярів (рис. 1.4).

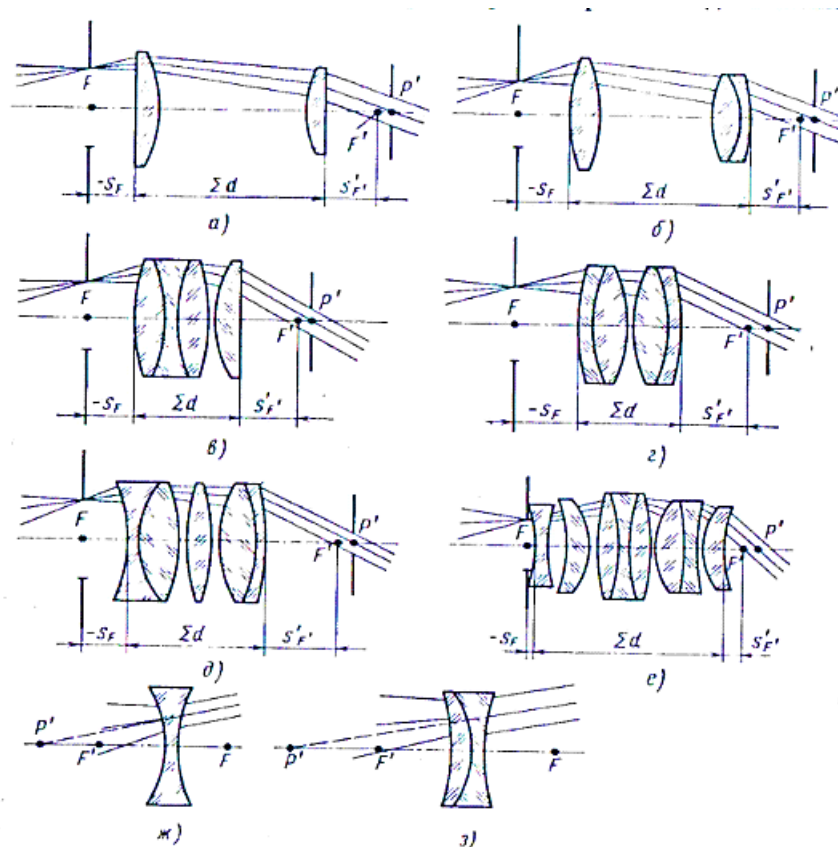


Рисунок 1.4 – Окуляри телескопічних систем:  
а – Рамсдена; б – Кельнера; в – ортоскопічний; г – симетричний;  
д – Ерфле; е – ширококутний; ж, з – негативні

**Окуляр Рамсдена** (рис. 1.4, а). Він складається з двох плоско-опуклих лінз, звернених опуклими поверхнями всередину. Перша лінза, вміщена поблизу фокальної площини окуляра, називається колективом; друга - очною лінзою. Відстань між лінзами не перевищує  $2/3f'_{\text{ок}}$ ;  $S_F$  і  $S'_F$ , приблизно рівні  $0,3f'_{\text{ок}}$ , а це означає, що вихідне вічко розташоване близько до останньої поверхні окуляра. Через мале віддалення вихідної зіниці окуляри Рамсдена з малою фокусною відстанню (менше 30) застосовувати не можна. Кутове поле  $2\omega'$  окулярів Рамсдена не більше  $20 - 30^\circ$ ; якість зображення не висока. Ці окуляри застосовують в найпростіших приладах, що мають малі діаметри вихідних зіниць.

**Окуляр Кельнера** (рис. 1.4, б). В результаті удосконалення окуляра Рамсдена був розроблений окуляр Кельнера. Цей окуляр також складається з двох компонентів: колективу і очної лінзи, але очна лінза ускладнена - вона склеєна з двох лінз. Кутове поле окуляра досягає  $40 - 50^\circ$ ; задній фокальний відрізок  $S'_F \approx 0,4f'_{\text{ок}}$  окуляри такого типу знайшли застосування в польових біноклях.

**Ортоскопічний окуляр** (рис. 1.4, в). Цей окуляр складається з двох компонентів, перший з яких склеєний з трьох лінз, другий - плоско-опукла лінза, звернена площиною до ока. Відстань між компонентами становить

частки міліметра. В окулярі цього типу краще, ніж в попередніх, виправлена дісторсія - звідси і назва ортоскопічний. Окуляр відрізняється значним віддаленням вихідної зіниці, що дорівнює приблизно  $0,75f'_{ок}$ ; кутове поле  $2\omega' \approx 40^\circ$ .

**Симетричний окуляр** (рис. 1.4, г). Більш висока якість зображення в порівнянні з раніше розглянутими дає симетричний окуляр. Він складається з двох однакових двохлінзових склеєних компонентів. Кутове поле його  $40-45^\circ$ . Окуляр отримав велике поширення завдяки простій конфігурації, хорошій якості зображення і великим віддаленням вихідної зіниці ( $S'_p \approx 0,75 f'_{ок}$ ).

**Окуляри Ерфле.** Окуляри, що складаються з двох компонентів, не можуть мати кутове поле більш  $50^\circ$ . Окуляри Ерфле складаються з трьох компонентів, два з яких - склеєні лінзи, третій - проста лінза. Кутове поле таких окулярів може бути доведено до  $70^\circ$ .

Відомі окуляри Ерфле двох типів. Фокальні відрізки окулярів 1-го типу:  $S_F \approx 0,3 f'_{ок}$ ;  $S'_F \approx 0,4 f'_{ок}$ ; для окулярів другого типу  $S_F \approx 0,35 f'_{ок}$ ;  $S'_F \approx 0,7 f'_{ок}$ . Окуляр 2-го типу відрізняється від окуляра 1-го типу тим, що його перший компонент містить негативну лінзу, завдяки чому забезпечується більше видалення вихідної зіниці. Найбільше застосування має окуляр 2-го типу (рис 1.4, д).

*Ширококутний окуляр з кутовим полем  $86^\circ$  наведено на рис. 1.4, е.*

Негативні окуляри звичайно складаються з однієї (рис. 1.4, ж) або двох склеєних між собою лінз (рис. 1.4, з). Окуляри такого типу застосовуються в трубах Галілея, що дають пряме зображення. Кутове поле негативних окулярів невелике – приблизно  $20^\circ$ .

## 1.4 Прості телескопічні системи. Зорові труби Кеплера і Галілея

Прості телескопічні системи складаються з двох компонентів: об'єктива і окуляра.

**Зорова труба Кеплера** (рис. 1.5). Ця система має позитивний об'єктив і позитивний окуляр. Так як фокусні відстані об'єктива  $f'_{об}$  і окуляра  $f'_{ок}$  - величини позитивні, то згідно з формулою (1.1) збільшення труби Кеплера негативне ( $\Gamma_T < 0$ ) тобто вона дає повністю перевернуте зображення. У площині дійсного зображення, що дається об'єктивом, встановлена польова діафрагма  $D_{п.}$ . У цій же площині поміщають пластинку з перехрестям або шкалою, яку називають сіткою. Повертаючи зорову трубу, її можна навести на будь-яку точку простору предметів і по сітці виміряти кутову відстань між предметами. На рисунку 1.5 показаний хід променів в трубі Кеплера з окуляром Кельнера. Визначимо положення зіниць. Матеріальними діафрагмами є: оправа об'єктива  $D_1$ , польова діафрагма  $D_{пд.}$ , оправа першої лінзи окуляра  $D_2$  і оправа другий лінзи окуляра  $D_3$ .

Знайдемо в зворотному ході зображення всіх діафрагм в просторі предметів. Зображення оправи об'єктива збігається з самої оправою, так як

попереду неї немає фокусуючих елементів; зображення польової діафрагми об'єктивом буде в нескінченності, тобто збігається з площиною спостережуваних предметів. Положення зображення об'єктивом оправи першої лінзи окуляра визначається за формулою відрізків:

$$\frac{f'}{a'} + \frac{f}{a} = 1 \quad (1.5)$$

або формулою Ньютона

$$z \cdot z' = f \cdot f' \quad (1.6)$$

Так як ця оправа розташована близько до фокальної площини об'єктива, то її зображення виходить на великій відстані попереду об'єктива і буде значно збільшеним. Оправу другої лінзи окуляра спочатку покажемо через першу лінзу – це проміжне зображення виходить кілька збільшеним праворуч від першої лінзи (уявне), оскільки  $f'$  першої лінзи майже в два рази більше за відстань між лінзами окуляра. Вважаючи проміжне зображення предметом для об'єктива, знайдемо його зображення. Так як предмет знаходиться від об'єктива на відстані, більшій  $f'_{об}$ , але меншому  $2 f'_{об}$ , то збільшене його зображення буде знаходитися перед об'єктивом на відстані, більшій подвійного фокуса відстані об'єктива. Положення і величину цього зображення визначимо за формулами (1.6) і (1.7), застосувавши їх двічі.

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{z} = -\frac{z'}{f'} \quad (1.7)$$

Перетин пучка променів, що йдуть з нескінченно віддаленої точки предмета, обмежується оправою об'єктива, отже, вона і є вхідною зіницею  $D$  і одночасно апертурною діафрагмою, а її зображення  $D'_1$ , що дається окуляром, - вихідною зіницею  $D'$ , з яким поєднується зіниця ока спостерігача.

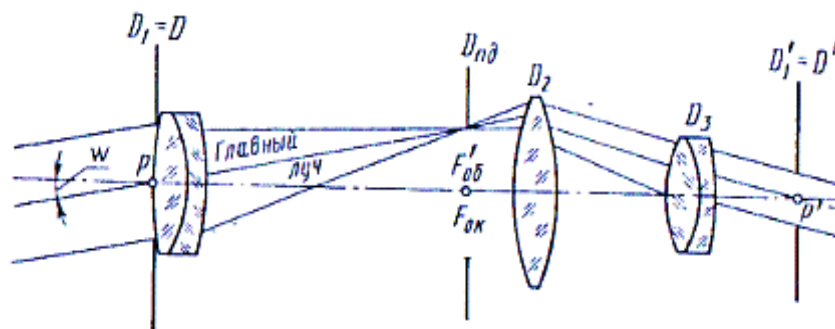


Рисунок 1.5 – Оптична схема труби Кеплера

Величини вхідного і вихідного зіниць пов'язані співвідношенням (1.1). Якщо зіницю ока  $D_{гл}$  менше вихідної зіниці зорової труби, то ефективний діаметр вхідної зіниці зменшується в  $D'/D_{гл}$  раз.

Простота конструкції, відсутність він'єтування при порівняно великих збільшеннях і кутовому полі, наявність площині дійсного зображення, де можна помістити сітку, є перевагами труби Кеплера. Істотний недолік її – перевернуте зображення, тому трубу Кеплера застосовують в тих випадках, коли розглядаємий предмет може бути сам перевернутий, наприклад, геодезична рейка, оцифровка якої робиться в перевернутому вигляді.

Трубу Кеплера застосовують також в астрономічних інструментах, де наявність перевернутого зображення не заважає спостереженню за зоряним небом.

**Зорова труба Галілея.** На відміну від труби Кеплера зорова труба Галілея має негативний окуляр. В якості окуляра найчастіше використовують просту двояковогнуту лінзу, передній фокус якої суміщений з заднім фокусом об'єктива. Так як в трубі Галілея  $f'_{об} > 0$ , а  $f'_{ок} < 0$ , то її збільшення позитивне  $\Gamma_T > 0$ , отже, зображення пряме.

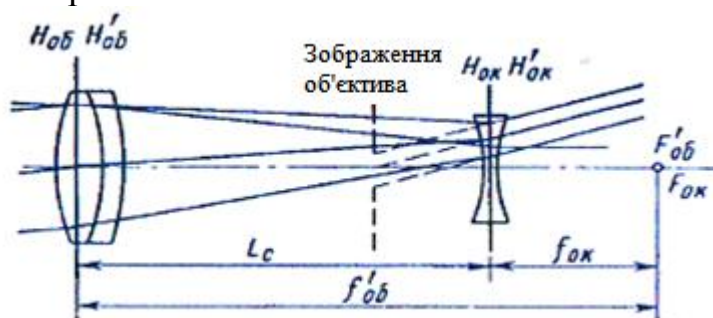


Рисунок 1.6 – Оптична схема труби Галілея

Довжину оптичної системи  $L_c$  з нескінченно тонкими компонентами, як і труби Кеплера, визначають за формулою  $L_c = f'_{об} + f'_{ок}$ . Так як для труби Галілея  $f'_{ок} < 0$ , то її довжина буде менше фокусної відстані об'єктива (рис. 1.6). При одному і тому ж збільшенні і рівних фокусних відстанях об'єктивів система Галілея коротше системи Кеплера на дві фокусних відстані окуляра. Незважаючи на такі позитивні властивості, як пряме зображення і мала довжина, труба Галілея має обмежене застосування. Це пояснюється її істотними недоліками, одним з яких є відсутність проміжного дійсного зображення. Оскільки труба Галілея не дає дійсного зображення, то в ній немає місця для кутомірної сітки або перехрестя, отже, трубу неможливо навести на будь-яку точку предмета. Крім того, кутове поле труби Галілея значно менше, ніж системи з позитивним окуляром, і залежить, як буде показано нижче, від положення ока спостерігача.

Трубу Галілея застосовують в наглядних системах, візирах фотоапарата, її також використовують в якості додаткової системи зміни збільшення.

Знайдемо положення зіниць труби Галілея, яка застосовується в якості наглядної системи. Для цього систему необхідно розглядати разом з оком (рис. 1.7). Знайдемо зображення двох матеріальних діафрагм - оправ об'єктива  $D_1$  і оправ окуляра  $D_2$  в просторі зображень. Зображення  $D'_1$  оправ об'єктива  $D_1$ , що дається окуляром, уявне і знаходиться всередині системи. Оправа

окуляра  $D_2$  сама розташована в просторі зображень, тому  $D''_2$  збігається з  $D_2$ . При порівнянні діаметрів усіх зображень виявляється, що зіниця ока є вихідною зіницею системи, тобто  $D' = D'_{\text{гл}} = 2\rho$ , так як діаметр ока менше  $D''_1$  і  $D''_2$ . Зображення (в зворотному ході) зіниці ока, що дається всією трубою, є вхідною зіницею  $D = D_{\text{гл}}$ . Вхідне вічко, розташоване праворуч від окуляра, буде уявним і збільшеним. Діаметр  $D_1$  об'єктива є він'єтуючою діафрагмою (і одночасно вхідним вікном), що обмежує пучки променів, що виходять з неосьових точок предмета (похилі пучки). Зображення  $D''_1$  він'єтуючої діафрагми є вихідним вікном системи «труба + око».

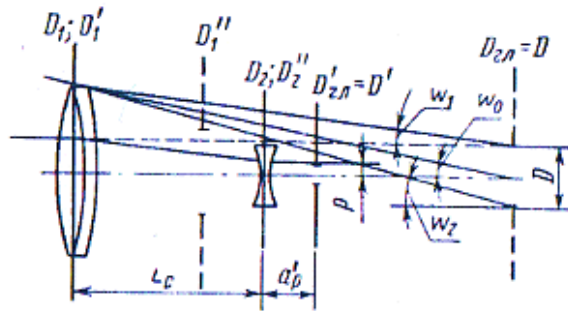


Рисунок 1.7 – Положення зіниць в спостережній трубі Галілея

Кутове поле труби Галілея залежить від діаметра об'єктива, а також від положення ока щодо окуляра. Користуючись рисунком 1.7, можна визначити кути поля, відповідні певній мірі він'єтування: 1) він'єтування немає - кутове поле мінімальне,  $\omega_1 = \omega_{\min}$ ; 2) він'єтування становить 50% – кутове поле  $\omega_0$ ; 3) 100% – не він'єтування – кутове поле максимальне  $\omega_2 = \omega_{\max}$ . Наведемо остаточні формули для визначення цих кутів:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \omega_1 &= \frac{D_1 - D}{2\Gamma(a'_p \Gamma + L_c)}; \\ \operatorname{tg} \omega_0 &= \frac{D_1}{2\Gamma(a'_p \Gamma + L_c)}; \\ \operatorname{tg} \omega_2 &= \frac{D_1 + D}{2\Gamma(a'_p \Gamma + L_c)}; \end{aligned}$$

Унаслідок він'єтування похилих пучків труби Галілея мають невелике збільшення і мале кутове поле.

## 1. 5 Обертаючі системи – лінзові і призматичні

Для спостереження предметів в прямому вигляді в тому випадку, коли не може бути використана труба Галілея, в зорову трубу вводять обертаючі системи, що встановлюються між об'єктивом і окуляром.

Обертаючі системи бувають двох видів: лінзові і призматичні. Лінзовий системи збільшують довжину труби, а призматичні зменшують її.

Застосовуються лінзові обертаючі системи двох видів: однокомпонентні (рис. 1.8, а) і двокомпонентні (рис. 1.8, б).

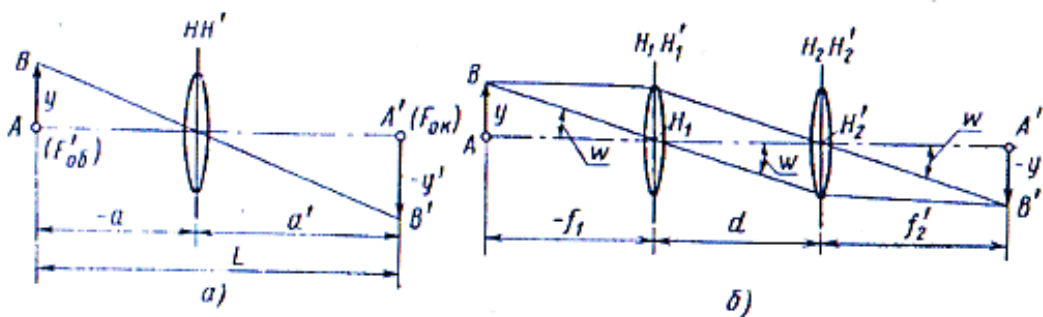


Рисунок 1.8 – Обертальні системи:  
а – однокомпонентна; б – двокомпонентна

Для обертаючої системи задня фокальна площина об'єктива і передня фокальна площина окуляра є сполученими, причому перша служить предметом, а друга - зображенням.

Лінійне збільшення однокомпонентної обертаючої системи  $\beta_{об.с} = a'/a$ . Якщо обертаючу систему помістити від предмета на відстані, то перевернуте нею зображення в масштабі 1:1 перебуватиме також на подвійній фокусній відстані за обертаючою системою. В цьому випадку лінійне збільшення дорівнює мінус одиниці.

Якщо задана довжина  $L_T$  всієї труби (передбачається, що труба складається з нескінченно тонких компонентів), то для визначення суми відрізків  $a$  і  $a'$  користуються виразом

$$L = -a + a' = L_T - f'_{об} - f'_{ок},$$

де  $L$  - відстань між фокальними площинами об'єктива і окуляра. При заданому збільшенні  $\beta_{об.с}$  і відомій відстані  $L$  можна знайти відрізки  $a'$  і  $a$ , а по ним і фокусну відстань обертаючої системи:

$$\frac{1}{f'_{об}} = \frac{1}{a'} - \frac{1}{a}.$$

Найбільш поширені зорові труби з обертаючими системами, що складаються з двох компонентів з паралельним ходом променів між ними (рис. 1.8, б). в подальшому компоненти обертаючої системи будемо називати просто обертаючими лінзами. Так як між лінзами обертаючої системи промені йдуть у вигляді паралельних пучків, то передній фокус першої обертаючої лінзи повинен бути поєднаний з заднім фокусом об'єктива, а задній фокус другої обертаючої лінзи - з переднім фокусом окуляра.

Визначимо збільшення обертаючої системи. З рисунка 1.8, б випливає, що трикутник  $ABH_1$  подібний трикутнику  $A'B'H_2$ , отже,



$$\frac{-y'}{y} = \frac{f_2'}{-f_1},$$

при  $f_1 = -f_1'$

$$\frac{y'}{y} = \frac{f_2'}{f_1'},$$

тоді

$$\beta_{об.с} = \frac{y'}{y} = - \frac{f_2'}{f_1'} \quad (1.8)$$

На рисунку 1.9 наведена схема зорової труби з двохлінзової обертаючої системою. Позначимо  $f_{об}$ ;  $f_1$ ;  $f_2$ ; і  $f_{ок}$  - відповідно фокусні відстані об'єктива, першої та другої обертаючих лінз окуляра. Так як пучок паралельних променів, які увійшли в об'єктив, після першої обертаючої лінзи залишається паралельним, то цю пару – «об'єктив + перша обертаюча лінза» можна розглядати як телескопічну систему, збільшення якої позначимо через  $\Gamma_{т1}$ . Друга обертаюча лінза з окуляром також утворює телескопічну систему, збільшення якої позначимо  $\Gamma_{т2}$ .

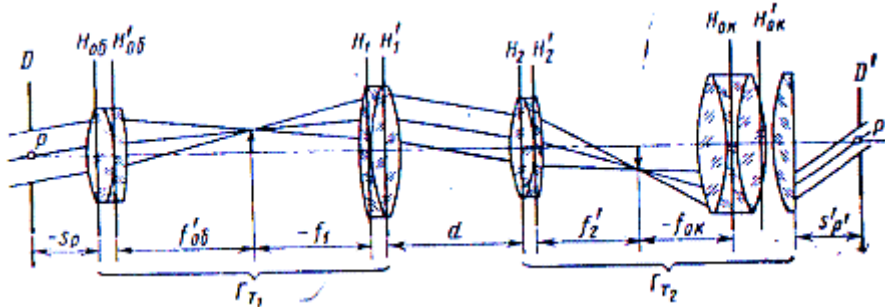


Рисунок 1.9 – Схема зорової труби з обертаючою системою з двох компонентів

Наведену схему можна розглядати як сукупність розташованих одна за одною двох телескопічних систем зі збільшенням  $\Gamma_{т1}$  і  $\Gamma_{т2}$ . Загальне збільшення  $\Gamma_{т} = \Gamma_{т1}\Gamma_{т2}$ , або

$$\Gamma_{т} = \frac{f'_{об}f'_2}{f_1f'_{ок}} = - \frac{f'_{об}}{f'_{ок}} \beta_{об.с} \quad (1.9)$$

Оскільки  $\Gamma_{т1} < 0$  і  $\Gamma_{т2} < 0$ , то загальне збільшення телескопічної системи - величина позитивна, а це означає, що зображення буде прямим.

Телескопічну систему з прямим зображенням можна отримати також за допомогою призматичних обертаючих систем. Зорові труби з призматичними обертаючими системами, на відміну від лінзових, більш компактні; їм можна надати необхідну конструктивну форму, створити перископічність, змінити напрямки візування.



### **Обертальні призми і системи призм.** Дахоподібні призми (дах-призми).

Для повного обертання зображення застосовують призми з дахом. Будь-яку відбивну призму можна перетворити в дахоподібну шляхом заміни однієї з граней, що відбивають двома, що утворюють між собою кут  $90^\circ$ . На рисунку 1.10 зображена проста прямокутна призма з дахом, нанесеним на гіпотенузній грані. Вхідний пучок променів, що має в січенні коло, повинен вписуватися в кут між гранями даху. Гострі кути призми В, С і ребро А можуть бути зрізані. При відображенні пучка променів від граней даху має місце повне внутрішнє віддзеркалення, тому немає необхідності їх сріблити. Довжина ходу променя в призмі  $d = 1,732D$ ;  $c = 1,732$ . Розміри  $AB = AC = 1,732D$ . На рисунку 1.11 представлені різні призми з дахом. Призначення дахоподібних призм – перевернути зображення зліва направо. В оптичних приладах виправдовується установка тільки однієї дахоподібної призми.

**Системи призм.** В оптичних приладах знаходять застосування комбінації різних призм, звані призматичними системами.

Призма-куб (рис. 1.12) складається з двох прямокутних призм, склеєних гіпотенузними гранями, одна з яких має покриття, що відбиває. Призма дає дзеркальне зображення; застосовується як оглядова призма при великих змінах кута візування. У положенні 1 працює тільки одна половина призми. У міру її повороту для візування в зеніт (положення 2) починає включатися друга половина призми – обидві половини працюють однаково, аналогічно призмі Дове.

Призму-куб застосовують в таких приладах, де потрібно оглядати послідовно весь простір в межах кута до  $210^\circ$  без перерви в спостереженнях. Призма повинна бути добре виготовлена, так як незначні помилки (порядку декількох секунд) в кутах і при склеюванні викликають двоїння зображення. Так як в положенні 2 вхідні грані призми нахилені до осі пучка, то її можна застосовувати тільки в паралельних пучках променів.

Система Порро першого роду (рис. 1.13) складається з двох прямокутних призм, кожна з яких має дві відображають межі. Головні січення призм розташовані в двох взаємно перпендикулярних площинах (ребра прямих кутів взаємно перпендикулярні). Система не відхиляє пучок променів ( $\omega = 0$ ), але зміщує його паралельно початкового напрямку. Зображення повністю перевернуте; хід променя дорівнює подвоєній довжині ходу променя в прямокутній призмі з двома відбиттями:  $d = 4D$ ;  $c = 4$ . Систему Порро першого роду застосовують в біноклях як обертаючу систему.

Система Порро другого роду (рис. 1.14) складається з трьох призм: однієї прямокутної призми з двома відбиваючими гранями і двох прямокутних призм, кожна з яких має одну відбиваючу грань. Система не відхиляє пучка променів ( $\omega = 0$ ), але зміщує його у бік; вона дає повне обертання зображення. Довжина ходу променя  $d = 4D$ ;  $c = 4$ .

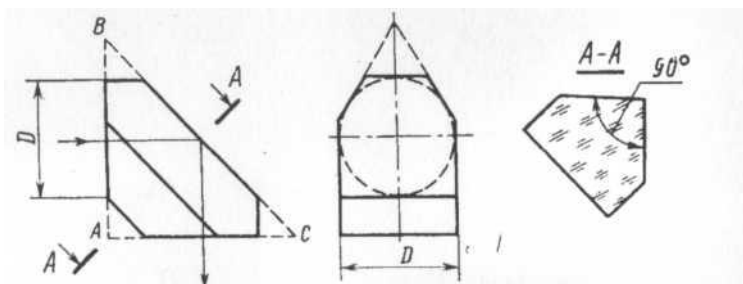


Рисунок 1.10 – Прямокутна призма з дахом Ак Р -90°

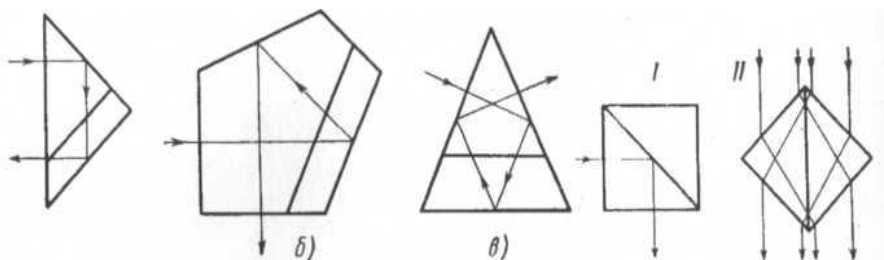


Рисунок 1.11 – Призми з дахом:  
а – прямокутна призма БР - 180°;  
б – пентапризма; в – призма Шмідта

Рисунок 1.12 – Призма - куб

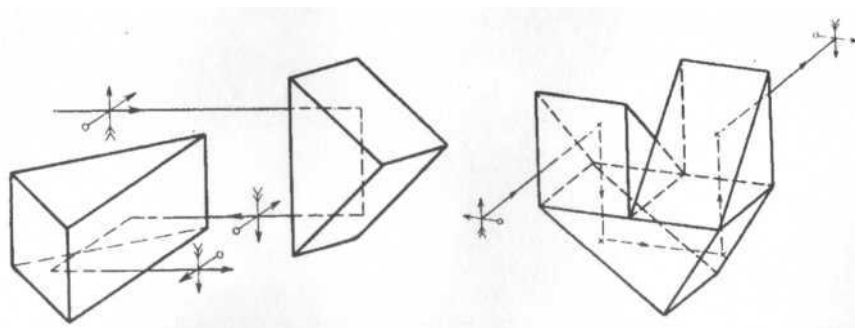


Рисунок 1.13 – Система Порро першого роду

Рисунок 1.14 – Система Порро другого роду

## 1.6 Призначення колектива в телескопічній системі

Розглядаючи хід головного променя похилого пучка (рис. 1.15), можна бачити, що розширення кутового поля  $\omega$  тягне за собою збільшення діаметра окуляра. Але так як окуляр зазвичай являє собою короткофокусним систему, то при збільшенні  $\omega$  матиме місце значне він'єтування. У цьому випадку в зорову

трубу вводять додатковий колектив, який встановлюють в фокальній площині об'єктива або поблизу неї.

Колективи використовують також в зорових трубах з лінзовими обертаючими системами, що мають значну довжину. Для зменшення діаметрів лінз при заданій довжині труби вводять колективи, які встановлюють в площинах (або поблизу від них) проміжних зображень.

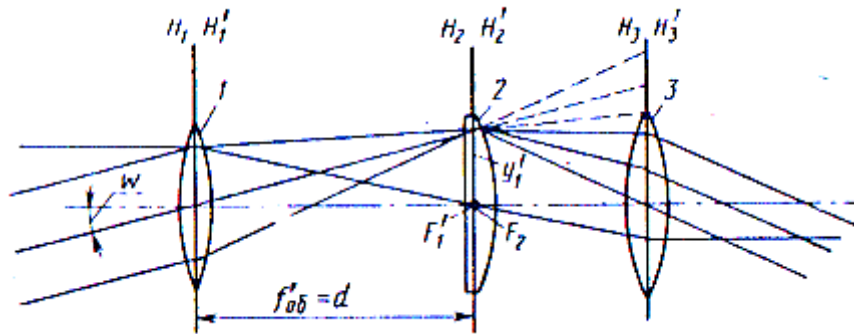


Рисунок 1.15 – Хід променів в системі з колективом

На рисунку 1.15 напрямок пучка променів після об'єктива (1) за його фокальній площиною при відсутності колективу (2) показано штриховою лінією – промені віддаляються від оптичної осі і не потрапляють на першу обертаючу лінзу (3); колектив пригинає пучок променів і направляє його на цю лінзу. На малюнку також видно, що колектив не впливає на хід осьового пучка променів.

Колектив, встановлений в фокальній площині об'єктива або поблизу неї, не впливає (або дуже слабо впливає) на розмір зображення  $u'_1$ , створюваного об'єктивом.

З метою зменшення діаметрів лінз окуляра колектив встановлюють і в фокальній площині окуляра. Іноді колектив вводять в фокальній площині окуляра для отримання потрібного видалення вихідної зіниці. В цьому випадку можна застосовувати як позитивні ( $f'_k > 0$ ) так і негативні ( $f'_k < 0$ ) колективи. При використанні позитивного колективу вихідне вічко наближається до окуляра, а діаметри лінз окуляра зменшуються; при негативному колективі вихідне вічко віддаляється від окуляра, але діаметри лінз останнього збільшуються.

## 2 ГАБАРИТНІ РОЗРАХУНКИ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ

### 2.1 Задачі габаритного розрахунку

Вимоги, щодо оптичних систем можуть бути розділені на наступні групи:

- вимоги до основних оптичних характеристик і габаритів системи;
- вимоги до якості зображення;

– вимоги до умов експлуатації.

В ході розрахунку оптичних систем повинні бути задоволені всі ці вимоги.

Розрахунок оптичної системи можна розділити на дві частини:

1. Розробка і обґрунтування принципової схеми, в тому числі обґрунтування вихідних даних для подальшого розрахунку, таких, як збільшення, кутове або лінійне поле, світлосила, ймовірні габарити і ін., А також розрахунок зовнішніх елементів системи;
2. Аберацийний розрахунок, або корекція абераций оптичної системи.

Перша частина розрахунку є попередньою і називається габаритним розрахунком. Завданням габаритного розрахунку є визначення числа компонентів, складових оптичної системи, і їх основних параметрів: фокусних відстаней, апертурних і польових кутів, відстаней між компонентами, світлових діаметрів, а також положень зіниць окремих компонентів і всієї системи. На цьому етапі розрахунку вибирають доцільну конструкцію оптичної системи, наприклад, найбільш зручний спосіб обертання зображення, тип обертаючої системи (лінзова або призмове), спосіб проектування джерела світла в проєкційних системах і ін.

На стадії габаритного розрахунку передбачається, що оптична система і її компоненти є ідеальними, тому розрахунок проводиться за формулами ідеальної оптичної системи. Компоненти системи вважаються нескінченно тонкими.

Отримані оптичні характеристики ( $f'$ ,  $2\omega$ ,  $D/f'$  та ін.) дозволяють вибрати типи окремих компонентів, що складають систему.

При виборі об'єктивів, окулярів, обертаючих систем та інших компонентів слід провести оцінку їх корекційних можливостей з метою одержання надалі задовільної якості зображення, однак не слід їх надмірно ускладнювати. Розрахунок можна вважати прийнятним, якщо основні оптичні характеристики компонентів системи не виходять за існуючі в практиці межі.

Визначення конструктивних елементів системи ( $r$ ,  $d$  і  $n$ ) є завданням аберацийного розрахунку. При розрахунку оптичних систем потрібно прагнути до використання готових компонентів (об'єктивів, окулярів, конденсорів і ін.), освоєних у виробництві, так як це значно здешевлює прилади і прискорює їх виготовлення.

## 2. 2 Габаритні розрахунки оптичних деталей

**Визначення розмірів плоских дзеркал.** Розміри дзеркала з зовнішнім шаром визначають по перетину поверхнею дзеркала світлового пучка, який воно відбиває.

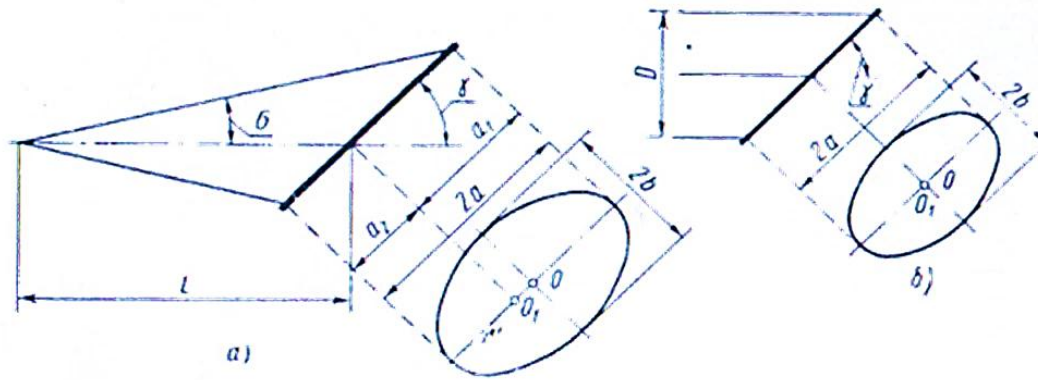


Рисунок 2.1 – Визначення розмірів плоского дзеркала:  
а – пучок що розходиться; б – пучок паралельних променів

Нехай на дзеркало падає пучок променів що розходиться, конічної форми з кутом при вершині  $2\sigma$  (рис. 2.1, а). Дзеркало нахилене до осі пучка під кутом  $\gamma$ ; відстань від дзеркала до вершини пучка -  $L$ . Використовуючи теорему синусів, отримуємо розміри дзеркала вгору і вниз від осі:

$$\alpha_1 = \frac{L \sin \sigma}{\sin(\gamma - \sigma)}; \alpha_2 = \frac{L \sin \sigma}{\sin(\gamma + \sigma)} \quad (2.1)$$

Перетин конуса пучка променів дзеркалом має форму еліпса, велика вісь якого дорівнює сумі розмірів  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$ ,  $2a = \alpha_1 + \alpha_2$ , а мала вісь

$$2b = \frac{2aL \tan \sigma}{\frac{L \sin \sigma}{\sin(\gamma + \sigma)} 2a - \frac{L \sin \sigma}{\sin(\gamma - \sigma)}}.$$

Якщо на дзеркало падає циліндричний пучок (рис. 2.1, б), діаметр якого дорівнює  $D$ , то перетин пучка дзеркалом буде також мати форму еліпса, мала вісь якого дорівнює діаметру пучка і не залежить від кута нахилу дзеркала, а велика вісь визначається за формулою

$$2a = \frac{D}{\sin \gamma} \quad (2.2)$$

З формул (2.1) і (2.2) видно, що чим менше кут, тим більше довжина дзеркала  $2a$ . За цими формулами розраховують світлові розміри дзеркал: повні розміри повинні бути дещо більше  $2a$  і  $2b$ , так як необхідно дати припуск на кріплення дзеркала.

**Визначення розмірів призми.** Розміри призми залежать від кута падаючого на неї пучка променів і від положення призми щодо вершини пучка. При визначенні розмірів відбивної призми її замінюють еквівалентною по переломлюючій дії плоскопаралельною платівкою, яка має ту ж довжину ходу променя. Якщо преломлюючі грані призми перпендикулярні оптичній осі системи, то завдання щодо визначення розмірів ще більше спрощується при

використанні прийому, званого «приведення розгортки призми до повітря», або скорочено «редукування призми». Якщо замінити вже розгорнуту в плоскопаралельну пластинку призму еквівалентною «повітряною» платівкою, тобто шаром повітря товщиною  $d'$ , що дорівнює геометричному ходу променя в призмі  $d$ , поділений на показник заломлення  $n$  скла призми:  $d' = d / n$ , то можна не розглядати заломлення на гранях призми, а вважати, що промінь йде як би в однорідному середовищі (повітрі).

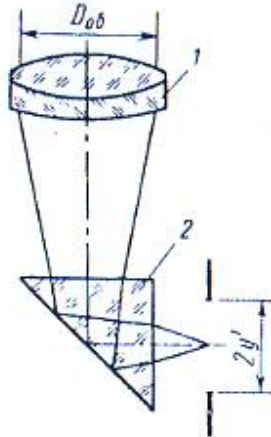


Рисунок 2.2 – Установка призми в пучок що сходиться

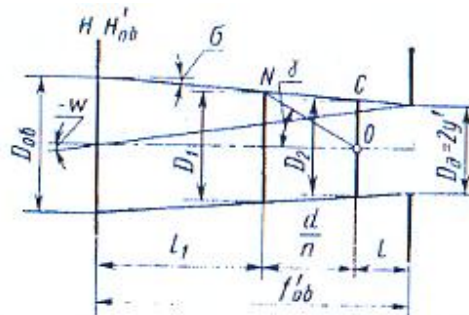


Рисунок 2.3 – Визначення світлових розмірів прямокутної призми

Наведемо приклад розрахунку світлових розмірів прямокутної призми 2, встановленої за об'єктивом 1 в пучку променів який сходиться, як показано на рисунку 2.2. Світловий діаметр об'єктива позначимо через  $D_{об}$ , кутове поле його  $2\omega$ , фокусна відстань  $f'_{об}$  (рис. 2.3). Визначимо діаметр польової діафрагми:

$$D_d = 2y' = -2 f'_{об} \operatorname{tg} \omega . \quad (2.3)$$

Можливі два випадки: 1)  $D_{об} > 2y'$  и 2)  $D_{об} < 2y'$ . Припустимо, що  $D_{об} > 2y'$ . Якщо положення призми не задано, то доцільно помістити її ближче до польової діафрагми, так як в цьому випадку розміри призми будуть зменшуватися. Однак не слід розташовувати вихідну грань призми занадто близько до площини польової діафрагми або поєднувати їх, так як можливі дефекти на цій грані - подряпини, відкриті бульбашки, порошинки і ін. будуть помітні при спостереженні через окуляр. Рекомендується поміщати вихідну

грань призми, від фокальної площини, на відстані  $l \geq 0,01 f'_{\text{ок}}^2$ , де  $f'_{\text{ок}}$  фокусна відстань застосовуваного окуляра; величина  $0,01 f'_{\text{ок}}^2$  становить 10 дптр.

Розгорнемо призму в плоскопаралельну пластинку і приведемо останню до повітря. Помістивши вихідну грань призми на відстань  $l$  від польової діафрагми, можна визначити її світловий розмір за формулою

$$D_2 = 2y' + 2l \operatorname{tg} \sigma, \quad (2.4)$$

де

$$\operatorname{tg} \sigma = \frac{D_{\text{об}} - 2y'}{2f'_{\text{об}}} \quad (2.5)$$

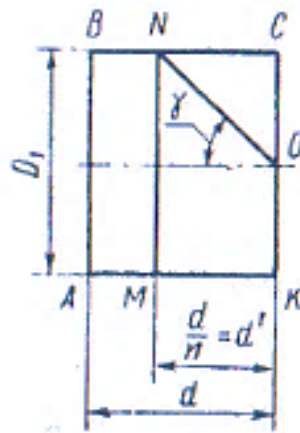


Рисунок 2.4 – Графоаналітичний метод визначення розмірів призми

Але як видно з рисунку 2.3, діаметр  $D_2$  перетину пучка вихідною межею менше, ніж діаметр  $D_1$  перетину пучка вхідною гранню; тому розгортка призми  $d$  і, отже, редукована товщина визначаються діаметром  $D_1$ . Для визначення діаметра  $D_1$  перетину пучка вхідною гранню проф. Турігін І. А. запропонував досить простий графоаналітичний метод, сутність якого полягає в наступному. Нехай АВСК – розгортка деякої призми (рис. 2.4); довжина розгортки  $d$ ; скорочена довжина  $d/n$ , тобто друга площина  $MN$  скороченої пластинки буде перебувати на відстані  $d/n$  від вихідної грані  $CK$ . З'єднаємо точку  $N$  з точкою  $O$  на середині грані  $CK$ , отримаємо кут  $\gamma$ . З рисунку 2.4 :

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{D_1 n}{2d}.$$

Знаючи тип призми, а отже, і довжину ходу променя в ній, величину  $d$  можна виразити як  $d = cD_1$ , де  $c$  – коефіцієнт призми. тоді

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{D_1 n}{2cD_1} = \frac{n}{2c}. \quad (2.6)$$

З формули (2.6) випливає, що кут  $\gamma$ - величина постійна для даного типу призми, яка не залежить від її лінійних розмірів. Діаметр  $D_1$  визначають графічним способом. Обчисливши кут, відкладають його від середини вихідної межі, як показано на рисунку 2.3. Продовжують пряму  $ON$  до перетину з променем, що йде з верхнього краю об'єктива в верхній край польової діафрагми; вимірюють відстань від точки  $N$  до оптичної осі і подвоюють його - отримують діаметр  $D_1$ . Діаметр  $D_1$  можна визначити і за формулою, яка виходить з розгляду рисунку 2.3. У трикутнику  $ONC$  відомі всі кути: кут  $NOC = 90^\circ - \gamma$ ; кут  $ONC = \gamma - \sigma$  і кут  $NCO = 90^\circ + \sigma$ .

За теоремою синусів

$$\frac{D_2}{2 \sin \gamma - \sigma} = \frac{NO}{\sin(90^\circ + \sigma)},$$

але  $NO = \frac{D_1}{2 \sin \gamma}$ , тоді

$$\frac{D_2}{2 \sin \gamma - \sigma} = \frac{D_1}{2 \sin \gamma \cos \sigma},$$

звідти

$$D_1 = \frac{D_2 \sin \gamma \cos \sigma}{\sin(\gamma - \sigma)} \quad (2.7)$$

де кут  $\sigma$  визначено формулою (2.5). За знайденими  $D_1$  визначають  $d$  і  $d'$ :

$$d = cD_1; \quad d' = \frac{d}{n}.$$

Слід зазначити, що довжину ходу променя в призмі визначають завжди за найбільшим розміром на гранях призми.

У практиці розрахунку оптичних систем іноді задають положення вхідної грані призми щодо об'єктива, тобто розмір  $l_1$ .

Тоді  $D_1$  обчислюють за формулою

$$D_1 = D_{об} - 2l_1 \operatorname{tg} \sigma;$$

потім обчислюють  $d = cD_1$ ;

$$\frac{d}{n} = d' \text{ і } D_2 = D_1 - \frac{2d}{n} \operatorname{tg} \sigma.$$

Якщо  $D_{об} < 2\gamma'$ , то прийоми для визначення розмірів призм будуть ті ж.

Розміри призми вибирають трохи більше розрахункових з урахуванням припусків на кріплення.



Розміри захисного скла, світлофільтрів, герметизуючих вікон і інших плоскопаралельних пластинок можуть бути визначені за тими ж формулами, що і розміри призм.

## 2. 3 Габаритні розрахунки телескопічних систем

Для розрахунку телескопічної системи повинні бути задані її основні характеристики:

- видиме збільшення  $\Gamma_m$
- кутове поле  $2\omega$
- діаметр вихідної зіниці  $D'$
- віддалення вихідної зіниці від останньої поверхні окуляра  $S'_{p'}$ .

Як правило, потрібно розрахувати оптичну систему мінімальної довжини та з мінімальним він'єтуванням.

### *Порядок розрахунку*

– Розрахунок починається з вибору типу окуляра і його фокусної відстані. Тип окуляра залежить від кутового поля в просторі зображень, званого окулярним полем, яке визначається за формулою (1.4). Обравши тип окуляра, конкретизують його фокусну відстань  $f'_{ок}$ .

Фокусну відстань окуляра вибирають з таких міркувань: видалення вихідної зіниці телескопічною системою мало відрізняється від заднього фокального відрізка  $S'_{F'}$  окуляра. Надалі після визначення положення вхідної зіниці щодо переднього фокуса об'єктива  $z_p$  уточнюють відстань  $S'_{p'}$  відповідно до формули

$$S'_{p'} = S'_{F'} + z'_{p'}, \quad (2.8)$$

де  $z'_{p'}$  – положення вихідної зіниці щодо заднього фокуса окуляра:

$$z'_{p'} = z_p \Gamma_T^2.$$

Відповідно до заданого  $S'_{p'}$  обирають фокусну відстань окуляра даного типу. Якщо знайденому куту  $2\omega'$  відповідають окуляри декількох типів, то слід вибрати окуляр з меншим фокусною відстанню при одному і тому ж  $S'_{F'}$ .

– Якщо від системи потрібно пряме зображення, слід визначити тип лінзової обертаючої системи. Найчастіше застосовують системи з двох компонентів з паралельним ходом променів між ними. Питання про вибір збільшення обертаючої системи вирішується окремо в кожному конкретному випадку габаритного розрахунку. Однак слід зазначити, що краще ставити

збільшення близьким до одиниці, тоді обидва компонента будуть однаковими, що полегшить в подальшому абераційний розрахунок всієї системи, і, крім того, система буде дешевше. Поставивши собі за збільшенням обертаючої системи  $\beta_{об.с}$ , за формулою (1.5) знайдемо співвідношення між фокусною відстанню її компонентів:

$$f'_2 = -f'_1 \beta_{об.с},$$

де  $f'_2$  та  $f'_1$  – фокусні відстані відповідно першого і другого компонентів.

– Визначають фокусну відстань об'єктива з (1.9) і його відносний отвір з урахуванням (1.1):

$$f'_{об} = -\frac{\Gamma_T f'_{ок}}{\beta_{об.с}}; \quad \frac{D}{f'_{об}} = \frac{D' \Gamma_T}{f'_{об}}.$$

– Знаючи фокусні відстані об'єктива і окуляра, а також довжину всієї системи, визначають суму фокусних відстаней компонентів обертаючої системи і відстань  $d_{1-2}$  між ними:

$$f'_1 + f'_2 + d_{1-2} = Lc - f'_{об} - f'_{ок}.$$

При виборі фокусних відстаней  $f'_2$  та  $f'_1$  рекомендується дотримуватися наступних обмежень: величина відносних отворів кожного з компонентів не повинна перевищувати 1 : 4, кутове поле не більше 10°. У цьому випадку можуть бути використані звичайні склеєні лінзи (ахроматичний об'єктив).

Іноді для зменшення діаметрів лінз обертаючої системи обмежують ширину  $2m_1$  похилого пучка променів для краю поля, вводячи коефіцієнт він'єтування  $K_w$ . У цьому випадку  $2m_1 = K_w D$ .

– Потім розраховують світлові, або діючі діаметри. Щоб визначити діаметри компонентів, розраховують хід трьох променів: апертурного і двох похилих (польових) променів, що йдуть з точки предмета на краю поля і падаючих на верхній і нижній краї вхідної зіниці. Розрахунок виконується за формулами.

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{h_1}{\alpha_1}; & \alpha_2 &= \alpha_1 + \frac{h_1}{f'_1}; & h_2 &= h_1 - d_1 \alpha_2; \\ \alpha_3 &= \alpha_2 + \frac{h_2}{f'_2}; & \dots & \\ \dots; \alpha'_k &= \alpha_k + \frac{h_k}{f'_k}; & \alpha'_k &= \frac{h_k}{\alpha'_k} \end{aligned}$$

Для і-го компонента:

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i + h_i \Phi_i; \tag{2.9}$$

$$h_{i+1} = h_i - d_i \alpha_{i+1}. \tag{2.10}$$

Для відмінності польових променів від апертурних в формулах (2.9) і (2.10)  $h_i$  та  $h_{i+1}$  замінюють на  $y_i$  та  $y_{i+1}$ , де  $y_i$  - відстань від оптичної осі точки перетину польового променя з головною площиною  $i$ -го компонента. Світлові діаметри визначають за максимальним значенням  $h_i$  або  $y_i$  :  $D_{\text{св}} = 2 h_i$  або  $D_{\text{св}} = 2 y_i$ .

Отримані в результаті габаритного розрахунку діаметри наближені, проте в більшості випадків для практичних цілей вони цілком прийнятні.

## 2.4 Габаритний розрахунок зорової труби Кеплера

Як приклад виконаємо габаритний розрахунок зорової труби з наступними характеристиками: збільшення  $\Gamma_T = -6^\times$  ; кутове поле  $2\omega = 6^\circ$ ; діаметр вихідного зіниці  $D' \geq 4$  мм; видалення вихідної зіниці  $S'_{p'} = 16$  мм. Відносно довжини труби жорстких обмежень немає, проте при забезпеченні всіх вимог довжина труби повинна бути мінімальною.

1. Виберем тип окуляра, для чого визначимо його кутове поле за формулою (1.4): при  $\omega = 3^\circ$   $tg\omega' = 6tg3^\circ = 6 \cdot 0,053 = 0,32$   $\omega' = 18^\circ$ ;  $2\omega' = 36^\circ$ . З найбільш простих такий кут поля мають окуляри Кельнера і симетричні окуляри; з названих слід вибрати той окуляр, який забезпечить необхідну видалення вихідної зіниці при коротшій фокусній відстані. У окуляра Кельнера  $S'_{F'} \cong 0,75f'_{\text{ок}}$ . Зупинимося на симетричному окулярі; визначимо його фокусну відстань, вважаючи  $S'_{F'} \cong S'_{p'} = 16$  мм:

$$f'_{\text{ок}} = \frac{S'_{F'}}{0,75} = \frac{16}{0,75} = 21,3 \text{ мм.}$$

Виберемо симетричний окуляр з фокусною відстанню 20 мм і  $S'_{F'} = -S_F = 14,9$  мм.

2. За формулою (1.1) знаходимо фокусну відстань об'єктива:

$$f'_{\text{об}} = \Gamma_T f'_{\text{ок}} = 6 \times 20 = 120 \text{ мм.}$$

Відомо, що в трубі Кеплера вхідним зіницею є оправа об'єктива, тому світловий діаметр об'єктива визначається величиною вхідної зіниці, яка дорівнює  $D = \Gamma_T D' = 6 \cdot 4 = 24$  мм, відносний отвір об'єктива  $\frac{D}{f'_{\text{об}}} = \frac{24}{120} = 1:5$  і кутове поле  $2\omega = 6^\circ$  забезпечує двохлінзовий склеєний об'єктив.

Оскільки вхідною зіницею є оправа об'єктива, то  $z_p = f'_{\text{об}} = 120$  мм. На підставі (2.8)

$$S'p' = 14,9 + \frac{120}{6^2} = 14,9 + 3,3 = 18,2 \text{ мм},$$

тобто видалення вихідної зіниці відповідає заданому ( $S'p' \geq 16$ ).

4. Діаметр польовий діафрагми (ПД) визначимо за формулою (2.3):

$$D_{\text{ПД}} = 2 \cdot 120 \cdot 0,053 = 12,7 \text{ мм}.$$

5. Довжина труби, що складається з нескінченно тонких компонентів,

$$L = f'_{\text{об}} + f'_{\text{ок}} = 120 + 20 = 140 \text{ мм}.$$

6. Знайдемо світлові діаметри об'єктива і окуляра. На рисунку 2.5 показаний хід апертурного ( $h_1 = 12 \text{ мм}$ ) і двох польових променів, що проходять через край вхідної зіниці ( $m = \pm 12$ ) і падаючих під кутом ( $-3^\circ$ ) до оптичної осі. Так як поле  $2\omega$  системи невелике, то похилий пучок променів проходить повністю без він'єтування. Світловий діаметр об'єктива дорівнює діаметру вхідної зіниці  $D_{\text{об,св}} = 24 \text{ мм}$ ; повний діаметр об'єктива з урахуванням 2 мм на його закріплення дорівнює 26 мм.

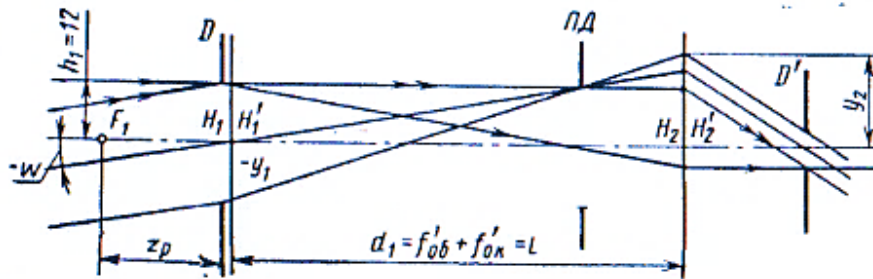


Рисунок 2.5 – Хід променів в трубі Кеплера

З рисунку 2.5 випливає, максимальну висоту на окулярі задає нижній промінь ( $y_1 = m = -12$ ), тому, користуючись формулами (2.9) і (2.10), розрахуємо хід через всю систему тільки цього променя:

$$\alpha_1 = \omega = -0,053, y_1 = -12, \Phi_1 = \frac{1}{120}, d_1 = (120 + 20) = 140;$$

$$\alpha_2 = -0,053 + \frac{-12}{120} = -0,053 - 0,1 = -0,153,$$

$$y_2 = -12 - 140 \cdot -0,153 = -12 + 21,4 = 9,4$$

Світловий діаметр окуляра  $D_{\text{ок,св}} = 2 \times 9,4 = 18,8$ ; повний діаметр

$$D_{\text{ок}} = 18,8 + 2 = 20,8 \cong 21 \text{ мм}.$$

Результати габаритного розрахунку наведені на рисунку 2.6.

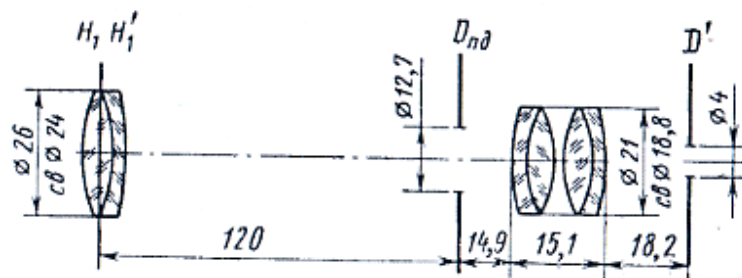


Рисунок 2.6 – Габаритна схема труби Кеплера

### 3 ВАРІАНТИ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Розрахувати оптичну схему зорової труби Кеплера за такими даними:

	1-й варіант	2-й варіант	3-й варіант
Збільшення	$\Gamma_m = -8^x$	$\Gamma_m = -4^x$	$\Gamma_m = -7^x$
Кутове поле	$2\omega = 4^0$	$2\omega = 8^0$	$2\omega = 6^0$
Діаметр вихідної зіниці	$D' = 3 \text{ мм}$	$D' = 4 \text{ мм}$	$D' = 3 \text{ мм}$
Віддалення вихідної зіниці	$s'_{p'} \geq 15 \text{ мм}$	$s'_{p'} \geq 15 \text{ мм}$	$s'_{p'} \geq 15 \text{ мм}$

	4-й варіант	5-й варіант	6-й варіант
Збільшення	$\Gamma_m = -6^x$	$\Gamma_m = -8^x$	$\Gamma_m = -8^x$
Кутове поле	$2\omega = 4^0$	$2\omega = 8^0$	$2\omega = 6^0$
Діаметр вихідної зіниці	$D' = 3 \text{ мм}$	$D' = 4 \text{ мм}$	$D' = 3 \text{ мм}$
Віддалення вихідної зіниці	$s'_{p'} \geq 15 \text{ мм}$	$s'_{p'} \geq 15 \text{ мм}$	$s'_{p'} \geq 15 \text{ мм}$

	7-й варіант	8-й варіант	9-й варіант
Збільшення	$\Gamma_m = -7^x$	$\Gamma_m = -6^x$	$\Gamma_m = -4^x$
Кутове поле	$2\omega = 4^0$	$2\omega = 8^0$	$2\omega = 6^0$
Діаметр вихідної зіниці	$D' = 3 \text{ мм}$	$D' = 4 \text{ мм}$	$D' = 3 \text{ мм}$
Віддалення вихідної зіниці	$s'_{p'} \geq 15 \text{ мм}$	$s'_{p'} \geq 15 \text{ мм}$	$s'_{p'} \geq 15 \text{ мм}$

	10-й варіант	11-й варіант	12-й варіант
Збільшення	$\Gamma_m = -10^x$	$\Gamma_m = -5^x$	$\Gamma_m = -6^x$
Кутове поле	$2\omega = 4^0$	$2\omega = 8^0$	$2\omega = 6^0$
Діаметр вихідної зіниці	$D' = 3 \text{ мм}$	$D' = 4 \text{ мм}$	$D' = 3 \text{ мм}$
Віддалення вихідної зіниці	$s'_{p'} \geq 15 \text{ мм}$	$s'_{p'} \geq 15 \text{ мм}$	$s'_{p'} \geq 15 \text{ мм}$

	13-й варіант	14-й варіант	15-й варіант
Збільшення	$\Gamma_m = -7^x$	$\Gamma_m = -6^x$	$\Gamma_m = -4^x$
Кутове поле	$2\omega = 4^0$	$2\omega = 8^0$	$2\omega = 6^0$
Діаметр вихідної зіниці	$D' = 3 \text{ мм}$	$D' = 4 \text{ мм}$	$D' = 3 \text{ мм}$
Віддалення вихідної зіниці	$s'_{p'} \geq 15 \text{ мм}$	$s'_{p'} \geq 15 \text{ мм}$	$s'_{p'} \geq 15 \text{ мм}$

	<b>16-й варіант</b>	<b>17-й варіант</b>	<b>18-й варіант</b>
<b>Збільшення</b>	$\Gamma_{\text{м}} = - 8^{\text{x}}$	$\Gamma_{\text{м}} = - 6^{\text{x}}$	$\Gamma_{\text{м}} = - 4^{\text{x}}$
<b>Кутове поле</b>	$2\omega = 4^0$	$2\omega = 8^0$	$2\omega = 6^0$
<b>Діаметр вихідної зіниці</b>	$D' = 3 \text{ мм}$	$D' = 4 \text{ мм}$	$D' = 3 \text{ мм}$
<b>Віддалення вихідної зіниці</b>	$s'_{p'} \geq 15 \text{ мм}$	$s'_{p'} \geq 15 \text{ мм}$	$s'_{p'} \geq 15 \text{ мм}$

Примітка. Довжина труби при забезпеченні всіх вимог повинна бути мінімальною.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Шарупич Л. С. Оптоэлектроника / Л. С. Шарупич. – М. : «Энергоатомиздат», 1984. – 356 с.
2. Василевский А. М. Оптическая электроника / А. М. Василевский. – Л. : «Энергоатомиздат», 1990. – 176 с.
3. Аблеков В. К. Оптическая и оптоэлектронная обработка информации / В. К. Аблеков. – М. : «Машиностроение», 1976 – 186 с.
4. Гвоздева Н. П. Прикладная оптика и оптические измерения / Н. П. Гвоздева. – М. : «Машиностроение», 1976. – 384 с.
5. Справочник конструктора оптико-механических приборов / Под. ред. В. А. Панова – Л. : Машиностроение, 1980. – 742 с.
6. Плотников В. С. Расчет и конструирование оптико-механических приборов / В. С. Плотников, Д. И. Варфоломеев, В. Е. Пустовалов. – М. : Машиностроение, 1983. – 256 с.
7. Ключникова М. Н. Проектирование оптико-механических приборов / М. Н. Ключникова, К. П. Ключников. – М. : Машиностроение, 1997. – 215 с.
8. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов / Ю. Г. Якушенков. – М. : Машиностроение, 1989. – 360 с.

*Навчальне видання*

Методичні вказівки та завдання

для практичних занять, самостійної роботи та РГР

із навчальної дисципліни

**«РОЗРАХУНОК І КОНСТРУЮВАННЯ ОПТИКО-  
ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ»**

*(для студентів денної і заочної форм навчання  
спеціальності 141- Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
спеціалізація «Світлотехніка і джерела світла»)*

Укладач **ЛИТВИНЕНКО** Анатолій Савелійович

Відповідальний за випуск *О. М. Ляшенко*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *А. С. Литвиненко*

План 2017 , поз. 223 М

---

Підп. до друку 13.06.2017

Формат 60х84/16

Друк на ризографі

Ум. друк. арк. 1,2

Зам. №

Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002  
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 5328 від 11.04.2017 р.